YAG レーザによるシリコンウエハの割断[†]

黒部利次* 市川和浩** 永井久司**

Breaking of Silicon Wafer by Irradiation of YAG Laser

by

Toshiji KUROBE*, Kazuhiro ICHIKAWA** and Hisashi NAGAI**

Cutting of brittle materials such as silicon wafer is usually made with a diamond scriber or a diamond thin blade wheel. It is said that the mechanical cutting of silicon wafer using the blade leads to lower cutting quality. A non-contacting cutting method using a CO₂ laser is recently being studied enthusiastically. Precision breaking of silicon wafer, however, has not been made. Breaking of silicon wafer with a YAG laser was studied at room temperature under water cooling of lapping surface. It was found from the experiments that the breaking of silicon wafer occurred through two stages of crack initiation and propagation. Meandering of the main crack is accompanied with some branching cracks which deteriorate the breaking quality of silicon wafer. Breaking mode is dependent strongly upon laser power, table feed rate and cooling condition.

Key words: Silicon wafer, YAG laser, Breaking, Quality

1 はじめに

ガラスやシリコンウエハ等の硬くてもろい材料を精密に切断する場合、一般に超硬の回転ローラチゼルを用いるか薄刃ダイヤモンド砥石等を用いて加工が行われる¹⁾。しかし、これらの加工法は工具を直接加工物に押当てて切断する加工法であり、切削粉の発生や飛散は避けられず、また、砥石加工にあってはクーラントの付着がつきまとう。切断品位の上からは、切断縁に微視き裂が残ることが大きな問題となっている。

一方、レーザビームを用いて非接触で硬ぜい材料を切断する加工法が研究されている。実際、炭酸ガスレーザを用いて種々のセラミックス材料の切断加工が行われている。しかし、本切断法は基材の溶融・蒸発が基礎となっており、熱ひずみの残留は避けられず切断品位は必ずしも良くない^{2),3)}。

一般に、ガラスやシリコン等のぜい性材料は熱伝導率が悪く、比較的小さな引張り応力によって簡単に破壊を起こす性質がある^{4),5)}。この性質を上手く利用することによって意図的に加工物にき裂を進展させることで微小な欠けや熱ひずみの少ない高品位な切断が可能になるのではないかと考えられる。レーザを試料表面に照射することによって材料内に急峻な温度こう配をつくり、その熱応力によって割れを誘発させ、それを制御し進展させることによって破断（割断）を起こさせるという考えである⁶⁾。前報では、均質等方性材料の透明板ガラスについて実験的検討を行った。その結果、条件を適切に選べば精密割断が可能になったことがわかった。本報では、力学的異方性を有する単結晶シリコンウエハについて割断試験を行った。その結果、興味ある知見を得たので報告する。

2 実験方法

2・1 実験装置

実験に使用したレーザ装置は、公称出力 100 W の YAG レーザ加工装置 (LAZ-A724 形: 東芝製) である。水平方向へ射出される波長 1.06 μm のレーザ光は、Fig. 1 に示す装置を用いてその光路を鉛直下方に変えて試料に照射される。収束レンズの焦点距離は 50 mm である。

Fig. 1. Optical system of YAG laser equipment.

- ① Laser beam
- ② Specimen
- ③ Cooling water
- ④ Holder
- ⑤ Alumina plate
- ⑥ Water cistern

Fig. 2. Specimen hold setup.

[†] 原稿受理 平成 6 年 3 月 14 日 Received Mar. 14, 1994

* 正会員 金沢大学工学部機械システム工学科 〒920 金沢市小立野, Dept. of Mech. Systems Eng., Kanazawa Univ., Kodatsuno, Kanazawa, 920

** 金沢大学大学院 〒920 金沢市小立野, Graduate Student, Kanazawa Univ., Kodatsuno, Kanazawa, 920

Fig. 3. Breaking direction of silicon wafer.

収束レンズの下には保護ガラスが備付けられており、空气中の塵や加工物からの蒸発微粒子の付着を防止している。収束レンズを収納しているホルダーは、焦点外しの影響を調べられるように上下方向に $\pm 6 \text{ mm}$ 移動可能となっている。本研究では、ジャストフォーカスの状態で切断試験を行った。焦点径は約 $300 \mu\text{m}\phi$ である。実験は連続発振波 (CW) で行った。

被切断用試料は、Fig. 2 に示す試料保持装置に取付けられる。試験片はアクリル樹脂製の保持板の上に載置され、切断部位は空中に保持される。切断は、試験片の中央部を試験片の長手方向にレーザを走査させることにより行った。切断の際に発生すると思われる下部からの輻射熱の影響を防ぐため、レーザ光散乱材として試験片の真下にはアルミナ板⑤が置かれている。Fig. 2 に示す試料保持具は X テーブル上に載置され、ステッピングモータによって $0.4 \sim 20.0 \text{ mm/sec}$ の速度範囲内で駆動させる。

切断試験は、空中および試料裏面を水冷した状態のもとで行った。水温は 20°C 一定とした。

2・2 試料および実験条件

切断試験に供した試料は、CZ (Czochralski) 法によって製造された $\phi 6$ インチの単結晶シリコンウエハである。実験に使用したウエハは、表面は鏡面研磨されているが裏面はラップ面となったものである。Fig. 3 にウエハの形状を示す。Fig. 3 から明らかなように、ウエハの円周の一部はカットされ直線形状になっている。これはオリエンテーションフラット (O.F.) と呼ばれ、X 線方位測定法により定められた特定の結晶方位を表わしている。切断試験は、O.F. に対して平行な方向とそれに垂直な方向について行った。実験に供した試料は、 $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 方位のウエハである。切断試験は主に $\langle 100 \rangle$ ウエハについて行った。

実験に際し、ダイヤモンドスクライバを用いて $\phi 6$ インチの単結晶シリコンウエハから試験片を切出した。試験片の形状は $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.78 \text{ mm}$ である。切断が安定に行われるように、試料の端面を GC #1200 番の砥粒を用いて荒ざり機でラッピングした。また、ガラスの切断の場合と同様に、試験片端部に面取りを施した。面取り角度は 45° である。面取りは GC #400 番の砥粒を用いて行った。面取り寸法は 0.3 mm である。

3 実験結果

3・1 き裂の発生・伝ばモード

(a) Air cooling

(b) Water cooling

Fig. 4. Optical micrograph of laser irradiated surface.

$\langle 100 \rangle$ 方位のウエハについて 0° 方向にレーザを照射して切断試験を行った。その際、レーザ出力を 70 W 、テーブル送り速度を 4.7 mm/sec としてレーザを試料表面 (鏡面) に照射した。切断後の試料表面 (レーザ照射面) の光学顕微鏡写真を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) は空气中で切断した場合の結果を、Fig. 4(b) は試料裏面を水冷した場合の結果を表す。切断の様子を模式図で示すと Fig. 5 のように表される。一方、切断面の光学顕微鏡写

Fig. 5. Schematic view of crack growth mode on surface.

(a) Air cooling

(b) Water cooling

Fig. 6. Optical micrograph of breaking cross section.

Fig. 7. Schematic view of breaking mode on cross section.

真を Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a) は空気中の結果を、Fig. 6 (b) は水冷の結果を表す。切断の様子を模式図で示すと Fig. 7 のように表される。Fig. 7 から、切断はき裂の発生過程と伝ば過程を経て起こることがわかる。

Fig. 5 から、き裂（主き裂）は蛇行しながら進展することがわかる。また、主き裂に直交するような形でサブき裂が所々で発生する。主き裂は、レーザの照射位置とは必ずしも一致せず一般にずれて進展する。レーザ照射によって表面は少し熱損傷を受ける。損傷はうすずみで示される領域にわたる。一方、Fig. 7 からき裂は、断面に特異な模様を形成しながら進行することがわかる。白地で示される部分がき裂の発生過程を表し、縞模様の部分がき裂の伝ば過程を示す。レーザ照射面直下には、熱損傷を受けたと思われる変質層が形成されている様子が Fig. 6 から観察される。

本研究では、Fig. 5 に記す δ_{in} , δ_{sub} , W の各値と、Fig. 7 に示す t の値に注目して、切断品位を検讨することにする。切断品位の向上を図る上からはこれらの値が小さくなることが望ましい。

3・2 切断品位

まず初めに、切断に及ぼすレーザ出力と最大送り速度の関係について調べた。実験結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 には、大気中で切断した（空冷式切断と称す）実験結果と試験片裏面（ラッピングを施した面）を水冷して切断（水冷式切断と称す）した結果を併載している。Fig.

Fig. 8. Relation between table feed rate and laser power.

8 に示す曲線は、その線よりも上の条件では切断は起こらずそれよりも下の条件で起こることを表している。すなわち、切断するための臨界条件を示している。Fig. 8 から、空冷、水冷のいずれの場合とも、レーザパワーが増すにつれて次第にテーブルの送り速度も大きくできることがわかる。切断速度を上げることが可能となる。Fig. 8 から、レーザパワーを一定とすれば、水冷式の場合は空冷式に比してテーブルの送り速度を著しく小さくしなければならないことが知れる。切断能率の観点からは水冷式はよくないといえる。

つぎに、テーブル送り速度を 4.7 mm/sec 一定として、 δ_{in} とレーザパワーの関係を調べた。測定結果を Fig. 9 に示す。ここで、 δ_{in} はき裂の発生位置とレーザ照射位置とのずれを表す。Fig. 9 から、レーザパワーが増すにつれて δ_{in} の値が次第に増加することがわかる。空冷式の場合には増加の程度が大きい。一方、水冷式の場合にはその増加の程度は極めて小さい。また、 δ_{in} の絶対値（水冷式）は空冷式のものに比してかなり小さい。切断品位の上からは水冷式切断が優れているといえる。

レーザパワーを 70 W 一定として、テーブル送り速度と δ_{in} の関係についても調べた。その結果、テーブル送り速度が速くなるにつれて δ_{in} の値が次第に小さくなることが明らかとなった。水冷式では種々の実験条件の下でも δ_{in} の値は安定して小さな値となった。一方、空冷式では、切断条件を最適にした場合にも、 δ_{in} の値は小さくなった。

つぎに、トレース痕幅 W （熱損傷域）について測定した結果を Fig. 10 に示す。測定は、切断開始位置から試験片長手方向に 2.5 mm 入った所で行った。Fig. 10 から、トレース痕幅はレーザパワーが増すにつれて直線的に増大することがわかる。同一のレーザパワーの所で水冷式と空冷式のトレース痕幅を比較すると、水冷式のトレース痕幅は空冷式の値に比して約半分以下となっている。このことは、試験片の裏面を冷却する行為は熱損傷の低減に著効があることを意味している。

Fig. 9. Relation between crack deviation width δ_{in} and laser power.

Fig. 10. Relation between heat damage width W and laser power.

Fig. 11. Relation between branching crack length δ_{sub} and laser power.

つぎに、サブき裂長さ δ_{sub} について測定を行った。測定結果を Fig. 11, Fig. 12 に示す。Fig. 11 は δ_{sub} とレーザーパワーの関係を、Fig. 12 は送り速度との関係を表している。Fig. 11 から、 δ_{sub} の値はレーザーパワーが増すにつれて直線的に増大することがわかる。また、Fig. 12 からテーブル送り速度が増すにつれて δ_{sub} の値は直線的に減少することがわかる。減少の度合は水冷式の方が大きい。サブき裂の発生とその伸張は、切断品位にとって最も重要であると思われる。Fig. 11, Fig. 12 に示す実験結果は、水冷が切断品位の向上にとって有効なことを物語っている。

つぎに、熱損傷域の試料深さ方向への広がり t について測定した結果を Fig. 13 に示す。

Fig. 13 から、レーザーパワーが増加するにつれて t の値は、空冷式の場合放物線的に増大することがわかる。しかし、水冷式の場合は直線的に増加するに過ぎない。

Fig. 12. Relation between branching crack length δ_{sub} and table feed rate.

Fig. 13. Relation between damage layer depth t and laser power.

また、その絶対値は空冷式のものに比してかなり小さい。

4 考 察

シリコンウエハに YAG レーザを照射して切断を行う場合、き裂は、Fig. 5, Fig. 7 に示す模式図のような伝ば過程を経て進展する。すなわち、切断は試験片端部でのき裂の発生 (Initiation) とそれに続く伝ば (Propagation) 過程を経て起こる。伝ば過程にあるき裂は、レーザー照射位置から少し離れた後方の位置にあってそれに追従しながら進展する。伝ば過程は切断の大部分を占める。

まず初めにき裂の発生過程について考える。切断は、レーザーを照射しながら試験片表面上を掃引して行われるが、レーザー光が試験片に入射する試験片端部は、ラッピングにより面取りが施されている。そのため、面取りした部分には無数の微視き裂が先在し、また、面は粗面となっている。表面粗さが大きくなると一般に、レーザー光

の吸収率が高くなることが知られている⁷⁾。レーザ光を一定速度で掃引してそれがラッピング面に到達すると、照射されている部分はしだいに温度が上がる。温度の上昇に伴って熱応力も次第に大きくなっていく。その熱応力の値が⁶⁾先在する微視き裂を進展させるのに十分な値に達すると、き裂は急激に伝ばする。しかし、レーザ光は静止熱源ではなく移動熱源となっているので、き裂の伝ばする領域は、移動熱源によって決まる熱応力と分布形態に依存し、試験片全体に一度に伝ばすることはない。

つぎにき裂の伝ば過程について考える。等方性材料のガラスをレーザ切断した場合、その伝ば過程の断面にはいかなる模様も観察されなかった。完全平坦平滑面となった。しかし、シリコンウエハの場合には Fig. 7 から明らかなように、伝ば過程にある切断面には規則正しい縞状の模様が観察された。ガラスの場合と大いに異なる現象である。シリコン単結晶材は力学的異方性を有する材料であるため、そのような模様が生じたと思われるが、その生成機構はここでは詳しくはわからない。熱応力解析と破壊力学による考察が必要と思われる。

試料裏面を水冷した場合、 δ_{in} , δ_{sub} , W , t の各値がいずれも空冷式の場合に比して小さな値となった。これは次の理由によるものと思われる。水冷式の場合、レーザ照射面は空中にあり裏面は水と接触している。レーザが照射されて試料表面の温度が上昇すると、その温度の一部は試料内部に伝わり、また、その一部は試料表面から空中へ放散する。裏面が水と接触している場合は、裏面からの熱の伝導が空中の場合に比べて大きくなることが予想される。このため表面と裏面の温度こう配がそれだけ大きくなる。すなわち、熱応力場の広がり狭くなることを意味している。このことによって、 δ_{in} , δ_{sub} , W , t の各値は空冷式の場合に比して小さくなったものと思われる。

切断試験は主として〈100〉方位の試料について行った。また、比較のため〈111〉方位の試料についても若干行っ

た。その結果、方位の切断に及ぼす影響は、き裂の発生過程について主として見られ、伝ば過程ではその影響はあまり見られなかった。〈111〉方位の試料のき裂発生過程での伝ばモードは、〈100〉方位の試料に比して幾分ジグザグに進展する。これはウエハの劈開面と切断方向と関係からそのようになったものと考えられる。

5 結 論

つぎのような結論が得られた。

YAG レーザをシリコンウエハに照射して切断する実験を行った結果、

(1) 切断は、き裂の発生とそのき裂が伝ばする過程を経て起こる。レーザ照射面には若干熱損傷域が残る。

(2) レーザ照射面を光学顕微鏡で観察した結果、き裂(主き裂)は蛇行しながら伝ばし、かつ、その主き裂に直交するような形でサブき裂が発生する。切断品位は、き裂の入射位置のずれ δ_{in} とサブき裂長さ δ_{sub} , それに熱損傷域の広がり幅 W とその深さ t によって評価できる。

(3) 試験片裏面を水冷すると、 δ_{in} , δ_{sub} , W , t の各値が小さくなることがわかった。切断品位は水冷することで上昇する。しかし、切断能率は若干低下する。

(平成3年3月26日 精密工学会春季大会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 木下正治, “表面界面の超精密・評価技術”, p. 96 (1991) サイエンスフォーラム.
- 2) 藤森康朝, “レーザプロセッシング”, p. 230 (1990) 日経産業図書.
- 3) 安永暢男, “レーザが変える加工技術”, p. 75 (1992) 海文堂.
- 4) 田中紘一, “破壊と材料”, p. 81 (1991) 裳華房.
- 5) 原 守久, 新開紀彦, 材料科学, **10**, 1, 34 (1973).
- 6) 黒部利次, 川向徳康, 高尾利幸, 材料, **42**, 1004 (1993).
- 7) 難波 進, “レーザと加工”, p. 18 (1983) 共立出版.